文章编号:1000-4939(2022)05-0932-06

磁流变胶滞回曲线三参数模型建模及参数识别

陈冬

(河北化工医药职业技术学院,050026 石家庄)

摘 要:利用安东帕流变仪(MRC302)测试了羰基铁粉质量分数为 40% 的磁流变胶应力-应变,应力-应变速率两个滞回曲线(频率 0.1 Hz,应变幅值 22%,温度 25 ℃,电流分别为 0 A、0.5 A、1 A、2 A、3 A、4 A、5 A)。利用遗传寻找最优算法,建立三参数液体模型,对磁流变胶的应力-应变,应力-应变速度进行参数识别。根据拟合结果与实验结果的均方差确定参数模型在各种电流下对磁流变胶动态特性建模的满意度。

关键词:磁流变胶;滞回曲线;三参数模型;遗传算法;满意度

中图分类号:TB381 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2022.05.015

Numerical simulation and analysis of transmission characteristics of safety coupling based on MR gel under Halbach permanent magnet arrangement

CHEN Dong

(Hebei Chemical & Pharmaceutical Vocational Technology College,050026 Shijiazhuang,China)

Abstract:In this paper,hysteresis curves (frequency,0.1 Hz;strain amplitude,22%;temperature,25 ℃;current,0 A,0.5 A,1 A,2 A,3 A,4 A,5 A,respectively) of stress-displacement and stress-velocity of magnetorheological (MR) gel were measured using MRC302. A three-parameter liquid model was established to identify the parameters of stress displacement and stress velocity of MRF by using genetic algorithm. According to the mean square deviation of the fitting results and the experimental results,the satisfaction of the parameter model to the dynamic characteristic modeling of MR gel under various currents was determined.

Key words:magnetorheological gel;hysteresis curve;three parameter liquid model;genetic algorithm;satisfaction

磁流变胶是一种新型磁流变智能材料,是由软磁微米级(3 ~5 μm)颗粒(如铁粉、羰基铁粉等),均匀悬浮在非导磁基液[1-3](如聚氨酯[4]、硅树脂[5]等)中形成的一种智能复合材料。磁流变胶的流变特性与磁流变液相似,即在无磁场环境下,其表现出胶体状的流动状态,一旦施加磁场,会在毫秒级时间内迅速变成类固态,并且具有一定的剪切屈服应力(剪切屈服应力随着磁场强度增大而先增大后趋于一个饱和值),当撤下磁场后又迅速恢复原来的胶体状态。整个过程具有快速、可逆、可控的特点[6]。磁

收稿日期:2021-02-12 **修回日期**:2022-01-18
基金项目:河北省教育厅青年基金资助项目(No. QN2018206)
通信作者:陈冬。E-mail:chendongxyz@126.com
引用格式:陈冬. 磁流变胶滞回曲线三参数模型建模及参数识别[J]. 应用力学学报,2022,39(5):932-937.
CHEN Dong. Numerical simulation and analysis of transmission characteristics of safety coupling based on MR gel under Halbach permanent magnet arrangement[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(5):932-937.

流变胶由于其基液是黏度比硅油更高的聚氨酯或者硅树脂等高分子材料，因此其基体黏度比磁流变液更大，能够防止颗粒由于久置而发生沉降现象[7-8]。因此，磁流变胶在某些工程应用中能够代替磁流变液发挥更大的优势，如磁流变阻尼器[9]、磁流变离合器[10]、磁流变吸振器[11]和磁流变制动器[12]等。

磁流变胶的动态力学性能预计介于磁流变液和磁流变弹性体之间，在施加激励时表现出黏性和/或弹性行为。正如预期的那样，对于磁流变材料动态特性，建立计算效率高的模型（即参数较少的模型）准确地描述动态力学响应是其工程应用的基础。文献[13]提出了黏-弹-塑性模型来预测 MR 阻尼器的动态滞回特性。Bouc-Wen 滞回算子用于描述材料或器件中力-变形关系的固有滞回特性[14]。为了更准确地描述磁流变阻尼器在大范围输入（振幅、频率和磁场）下的动态黏弹性行为，文献[15]提出了修正 Bouc-Wen 模型。考虑到磁流变材料在纯剪切模式下的剪切稀化和惯性效应，文献[16]提出了基于 Bouc-Wen 滞回模型的无弹簧单元动力学模型。

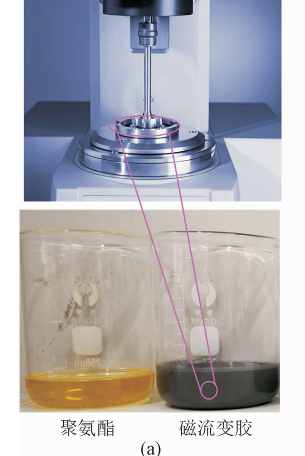
文献[17]提出准静态一维模型，该模型假设磁相互作用仅仅存在于链中 2 个相连颗粒间；并且应力大小与颗粒磁化强度二次成正比。基于以上假设，将模型运用到磁流变弹性体中得到较好的拟合结果。文献[18]建立了考虑链中所有颗粒影响的磁弹模型，该模型根据磁弹性力学的基本最小能量原理，计算磁化强度分布并对磁流变弹性体的力学性能进行拟合。文献[19]针对磁流变液的力学特性提出了双黏度模型，该模型根据外部剪切应力的大小将力学行为分为屈服前阶段和屈服后阶段，并将该模型运用到磁流变液中，结构显示该模型更加适合磁流变液工作在挤压模式下的流动情况。文献[20]在 Binham 模型的基础上提出 Herschel-Bulkley 模型，该模型能够将屈服后的磁流变液的剪切稀化表现出来，能够比 Bingham 模型更加准确地描述磁流变液的力学模型。

以上模型都是针对磁流变胶以外的材料（磁流变液和磁流变弹性体）进行建模和参数识别，而磁流变胶作为新型磁流变智能材料，在工程应用中具有潜在应用价值。因此，针对磁流变胶力学特性的建模研究具有一定的价值和意义。基于磁流变胶离合器的输出扭矩可控，其优点在于能够实现半主动控制。而实现控制的前提就是需要掌握磁流变材料的动态流变特性，并对其在各个激励条件下的流变响应展开参数化建模，建立一般化的能够准确有效预测磁流变胶动态流变行为的参数模型，为实现磁流变器件半主动控制打下理论基础。

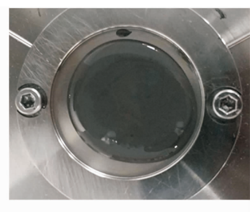
本研究主要针对磁流变胶的应力-剪切应变、应力-剪切速率的滞回曲线，基于遗传优化算法，建立三参数液体模型，并对其展开力学特性的参数建模和参数识别。最后根据拟合结果与实验结果的均方差，对参数模型在不同电流下对磁流变胶动态特性建模的满意度。

1　磁流变胶滞回曲线测试

测试装置如图 1 所示。研制羰基铁粉质量分数为 40% 的聚氨酯基磁流变胶体如图 1(a)所示。在室温条件(25 ℃)下对研制的磁流变胶应力-应变、应力-应变速率曲线进行测试。图 1(a)所示测试工具为安东帕(型号：MRC302)流变仪。流变仪两测试平板直径均为 20 mm，设置流变仪两平板之间的距离为 1 mm。图 1(b)和图 1(c)分别为磁流变胶在无外加磁场下(表现出类胶体)和外加磁场下(表现出类固体特性)的宏观现象。测试条件为：频率 0.1 Hz，应变幅值 22%，施加电流 0 A、0.5 A、1 A、2 A、3 A、4 A、5 A。



(a)


(b) 无外加磁场


(c) 施加磁场

图 1　测试装置

Fig. 1　Test device

不同电流下应力-应变、应力-应变速率如图 2 所示。从图 2(a)中可以看出，当施加电流为 0 A 时，磁流变胶应力-应变表现出黏性特性，当施加电流后，磁流变胶应力-应变曲线表现出具有黏弹性特性，并且黏度(滞回曲线包络的面积)和弹性(滞回曲线最大应力和最小应力之间的连接线)随着外部

电流强度增大而增大。这是由于随着电流的增大,磁流变胶所在区域磁场强度越大,成链越粗导致的。从图 2(b)中可以看出,施加电流后磁流变胶的滞回曲线具有明显的非线性特性。

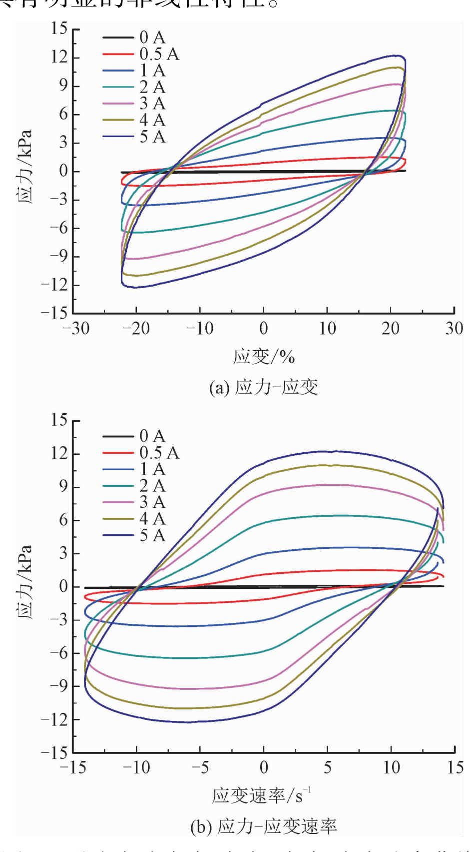


图 2 磁流变胶应力-应变、应力-应变速率曲线

Fig. 2 Stress-strain and stress-strain rate curves of MR gel

2 三参数模型

由于磁流变胶在无磁场下为一类黏性流体,因此其动力学模型需要一个初始的黏性单元 c_1,在施加磁场后,表现为类固体状态,具有一定的磁控黏弹性特性,即当简谐应变作用在其应变-应力滞回曲线时,同时具有黏性特性和弹性特性。因此,在磁场作用下,其动力学模型需要用可控的黏弹性单元表示,这部分采用 Kelvin 模型单元中由黏性单元 c_2 和弹性单元 k_2 表示。另外,同时需能够准确表示其在有无磁场下的黏弹性行为,这一部分用 c_1 来表示。因此,其总体参数模型如图 3 所示(称为三参数模型)。

图 3 中三参数液体模型中有 Kelvin 模型单元(图中虚线部分)。Kelvin 模型单元中有黏性单元 c_2 和弹性单元 k_2。从图 3 中可以看出三参数液体模型是在 Kelvin 模型单元串联一个黏性单元 c_1。因此,三参数液体模型可以通过式(1)描述,即

$$\begin{cases} F + f_0 = c_1 \dot{x}_1 \\ F + f_0 = k_2(x - x_1) + c_2(\dot{x} - \dot{x}_1) \end{cases} \tag{1}$$

式中:F 为模型应力;f_0 为初始应力。

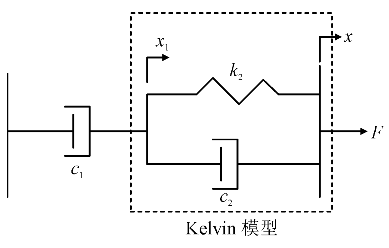


图 3 三参数液体模型

Fig. 3 Three-parameter fluid model

模型计算所得应力与实测应力之差的均方根值与对应电流下实测的最大应力比值作为模型满意度,如式(2)所示。

$$ff = \frac{\sqrt{\dfrac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}(F_n - \tau_n)^2}}{M} \times 100\% \tag{2}$$

式中:ff 为模型满意度;N 为数据个数;F_n 为第 n 个点的模型预测值;τ_n 为第 n 个点的实测值;M 为各个电流下实测的最大应力值。

3 结果与讨论

在不同电流激励下,利用遗传算法对该模型参数进行最优识别,具体优化算法流程如图 4 所示。

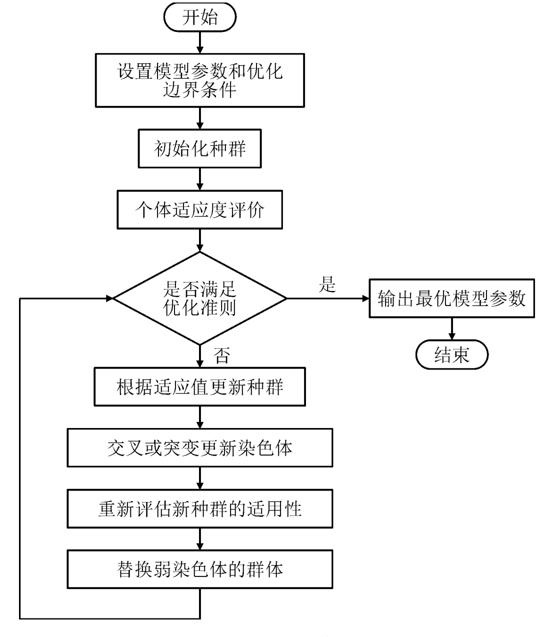


图 4 GA 最优求解模型参数流程示意图

Fig. 4 Flow chart of GA optimal solution model parameters

图 5 和图 6 分别表示不同电流下磁流变胶应

力-应变，应力-应变速率三参数液体模型拟合和实测值对比曲线。从图 5 和图 6 可以看出，三参数液体模型能够很好地拟合磁流变胶应力-应变、应力-应变速率曲线。不同电流下三参数液体模型参数识别结果如表 1 所示。

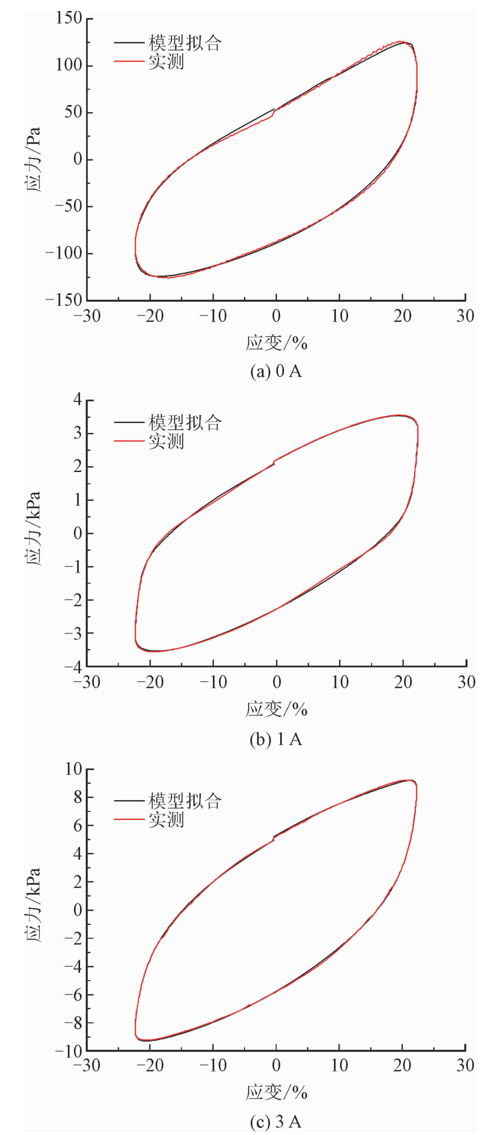


图 5　不同电流下磁流变胶应力-应变三参数液体模型拟合和实测值对比曲线

Fig. 5　Stress-strain comparison curves of three-parameter liquid model fitting and measured value of MR gel under different currents

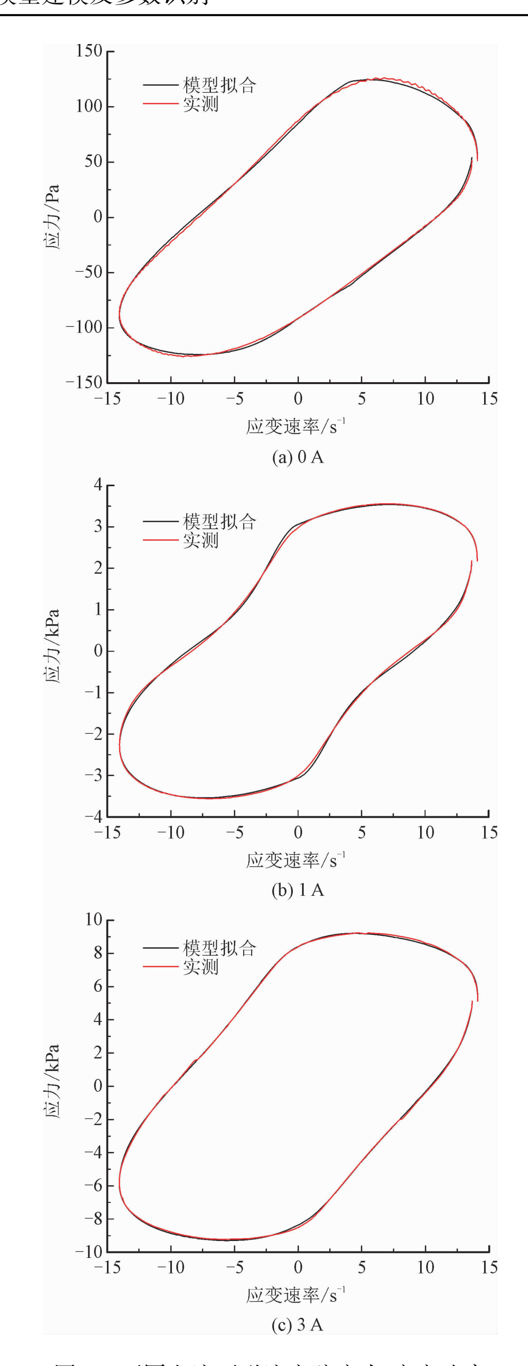


图 6　不同电流下磁流变胶应力-应变速率三参数液体模型拟合和实测值对比曲线

Fig. 6　Stress-rate comparison curves of three-parameter liquid model fitting and measured value of MR gel under different currents

从表 1 可以看出，c_1 和 c_2 的值随着电流强度增大而增大，说明材料的黏性随着电流增大而增大，该结论与图 2(a) 中的滞回曲线面积随着电流增大而增大相符。k_2 的绝对值随着电流强度增大而增大，该结论也与图 2(a) 中的滞回曲线平均斜率(滞回曲线最大应力和最小应力之间的连接线)随着外部电流强度增大而增大相符。在不同电流下，三参数液体模型对实测值的拟合满意度均小于 10%，在接受范围之内。

三参数模型中的 3 个参数 c_1、c_2 和 k_2 都随着外加电流表现出单调变化；具体来说，c_1 和 c_2 随着电流增强而单调增大，k_2 随着电流增强而单调减小。

这种模型参数值随电流单调变化有助于后期控制系统的设计,说明用该模型描述磁流变胶动态流变特性具有较好的可控特性。由于磁流变材料及其功能器件(如阻尼器)具有内在非线性滞回特性,如何建立适合的模型去表征这一独特的特性是目前面临的问题之一。因此,三参数液体模型可作为磁流变胶特性的动态模型,用于工程控制当中,实现磁流变胶的工程应用,拓宽磁流变材料的应用领域,特别是类似磁流变阻尼减振器等能耗型器件,需要对材料的滞回曲线进行研究分析,把握其黏弹性特性随外部激励(如电流、应变频率等)的变化情况,建立与其滞回特性相适应的参数模型进行描述,具有一定的理论指导意义。

表 1 模型参数识别结果与对应的满意度

Tab. 1 Model parameter identification results and corresponding satisfaction

模型	电流/A	c_1	c_2	k_2	f_0	ff/%
三参数液体模型	0	4.46	3.79	-6.33	13.46	7.33
	0.5	51.75	41.79	-9.84	282.60	8.11
	1	137.15	111.09	-23.82	414.61	6.67
	2	280.04	215.92	-69.39	342.64	6.93
	3	378.67	320.49	-173.11	361.32	6.64
	4	470.95	385.51	-305.82	240.30	6.77
	5	567.27	429.98	-320.93	18.21	7.49

4 结束语

本研究对自行研制的羰基铁粉质量分数为 40% 的聚氨酯基磁流变胶的滞回特性进行建模。实验测得磁流变胶应力-应变,应力-应变速率 2 个滞回曲线(频率 0.1 Hz,应变幅值 22%,温度 25 ℃,电流分别为 0 A、0.5 A、1 A、2 A、3 A、4 A、5 A)。并且利用遗传寻找最优算法,建立三参数液体模型对磁流变胶的应力-应变,应力-应变速率进行参数识别。根据拟合结果与实测结果的均方差与对应电流下实测的最大应力值的比,确定参数模型在各种电流下对磁流变胶动态特性建模的满意度。研究结果表明,不同电流下利用三参数液体模型拟合后的满意度均小于 10%,因此,三参数液体模型能够很好地表示磁流变胶滞回特性。

参考文献:

[1] 张广,汪辉兴,欧阳青,等. 硅树脂基磁流变胶流变特性研究及 Herschel-Bulkley 模型参数识别[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(6):62-71.
ZHANG Guang, WANG Huixing, OUYANG Qing, et al. Study on rheological properties of silicone based MR adhesives and identification of Herschel-Bulkley model parameters[J]. Journal of Hunan University (natural science edition), 2018, 45 (6): 62-71 (in Chinese).

[2] ZHANG G, WANG H, WANG J, et al. Dynamic rheological properties of polyurethane-based magnetorheological gels studied using oscillation shear tests[J]. Royal society of chemistry, 2019, 18(9): 10124-10134.

[3] MEHARTHAJ H, SIVAKUMAR S M, AROCKIARAJAN A. Significance of particle size on the improved performance of magnetorheological gels[J]. Journal of magnetism and magnetic materials, 2019, 490(15): 165483.

[4] DE SOUSA S R G, DOS SANTOS M P, BOMBARD A J F. Magnetorheological gel based on mineral oil and polystyrene-b-poly (ethene-co-butadiene)-b-polystyrene[J]. Smart materials and structures, 2019, 28(10): 105016.

[5] ZHANG G, WANG H, QING O, et al. Numerical analysis of multiphysical field for independent three-stage magnetorheological damper of double rod during recoil process of artillery[J]. Journal of mechanical engineering science, 2019(1): 1989-1995.

[6] PANG H, PEI L, SUN C, et al. Normal stress in magnetorheological polymer gel under large amplitude oscillatory shear[J]. Journal of rheology, 2018, 62(6): 1409-1418.

[7] ZUBAREV A, CHIRIKOV D, STEPANOV G, et al. On the theory of hysteretic magnetostriction of soft ferrogels[J]. Physica A: Atatistical mechanics and its applications, 2018, 498: 86-95.

[8] XU Y, LIU T, LIAO G, et al. Magneto-dependent stress relaxation of magnetorheological gels[J]. Smart materials and structures, 2017, 26(11): 115005.

[9] 张广,汪辉兴,欧阳青,等. 磁流变缓冲器在火炮后坐中的热流耦合场分析[J]. 上海交通大学学报(自然版),2019,53(4):504-512.
ZHANG Guang, WANG Huixing, OUYANG Qing, et al. Analysis of thermal flow coupling field of MR buffer in gun recoil[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University (natural science edition), 2019, 53(4): 504-512 (in Chinese).

[10] TIAN Z Z, CHEN F, WANG D M. Influence of interface deforma-

tion on transmittable torque of disk-type magnetorheological clutch [J]. Journal of intelligent material systems and structures, 2015, 26(4): 414-424.

[11] 苏彬彬，徐凯，李连进. 主动式磁流变液阻尼动力吸振器的优化设计[J]. 天津理工学院学报，2004，20(2)：37-38.
SU Binbin, XU Kai, LI Lianjin. Optimization design of active MR fluid damping dynamic vibration absorber [J]. Journal of Tianjin Institute of Technology, 2004, 20(2): 37-38(in Chinese).

[12] 熊光洁，张元培，都俊超. 磁流变制动器的实验研究[J]. 起重運輸機械，2005(10)：38-40.
XIONG Guangjie, ZHANG Yuanpei, DU Junchao. Experimental study on MR brake [J]. Lifting and transportation machinery, 2005(10): 38-40(in Chinese).

[13] PANG L, KAMATH G, WERELEY N. Dynamic characterization and analysis of magnetorheological damper behavior [C]//Proceedings of 5th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials. San Diego, CA: Scholarly Publications, 1998: 284-302.

[14] ISMAIL M, IKHOUANE F, RODELLAR J. The hysteresis bouc-wen model, a survey [J]. Archives of computational methods in engineering, 2009, 16(2): 161-188.

[15] SPENCER B, DYKE S, SAIN M, et al. Phenomenological model for magnetorheological dampers [J]. Journal of engineering mechanics-asce, 1997, 123(3): 230-238.

[16] JANSEN L, DYKE S. Semiactive control strategies for MR dampers: Comparative study [J]. Journal of engineering mechanics, 2000, 126(8): 795-803.

[17] JOLLY M R, CARLSON J D, MUNOZ B C. A model of the behaviour of magnetorheological materials [J]. Smart materials and structures, 1996, 5(5): 607.

[18] BORCEA L, BRUNO O. On the magneto-elastic properties of elastomer-ferromagnet composites [J]. Journal of the mechanics and physics of solids, 2001, 49(12): 2877-2919.

[19] STANWAY R, SPROSTON J L, EL-WAHED A K. Applications of electro-rheological fluids in vibration control: A survey [J]. Smart materials and structures, 1996, 5(4): 464.

[20] WANG X, GORDANINEJAD F. Flow analysis of field-controllable, electro-and magneto-rheological fluids using Herschel-Bulkley model [J]. Journal of intelligent material systems and structures, 1999, 10(8): 601-608.

（编辑　李坤璐）

